4 阵元微带天线阵列试制与测试

段雪峰[1,2]，闫浩*[1,2]，王凯[1,2]，李健[1,2]，曹亮[1,2]，裴鑫[1,2]，马军[1,2]

（1.中国科学院新疆天文台,新疆 乌鲁木齐 830011;2.新疆微波技术重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：将阵列天线放置于射电望远镜焦平面处，结合波束合成网络，可以同时观测一片天区、实现更大视场覆盖。由于需要对各个阵元的幅度和相位进行调控，阵列天线实际就是一个小型相控阵，因此在做阵列设计时，除需结合反射面焦面场分布及望远镜拟实现的视场以外，阵列自身的性能验证可参照传统相控阵进行。本文设计并加工了工作在1.27GHz 的 2×2 矩形排布微带贴片天线阵列，阵元间距为 0.7 倍波长。经实测，各端口 S11 均在-10dB 以下，4 阵元合成后波束增益为 12.54dBi，通过为对应阵元添加理论偏移 30 度的延时线，实测阵列的波束扫描角度为 28.3 度。上述实测数据与仿真结果相比虽略有差异，这和阵列加工及馈电端口焊接有关，但相关工作为之后更多阵元的阵列天线设计、研制及测试积累了经验，尤其对性能验证具备较好的指导意义。

关键词：接收机；阵列天线；回波损耗；方向图；波束扫描

中图分类号：P111.5；文献标识码：A　　　文章编号：

引言

在射电天文领域，射电望远镜是被用于接收宇宙电磁波以开展相关科学研究的观测装置[1]。射电望远镜是反射面天线用于信号接收的一种典型应用，而接收机则是安装于射电望远镜焦点处，用于接收射电信号的具体设备[2,3]。

由于接收机安装到射电望远镜后，指向某一天区的波束宽度非常小，开展巡天观测效率低下。因此，焦平面接收机应运而生。焦平面接收机由于其系统组成不同，其馈源方式可分为多波束馈源和相控阵馈源。前者即为多个传统单波束馈源的集成，各个波束之间相互分立，图 1 是澳大利亚 CSIRO 为贵州 500 米球面望远镜 FAST 所研制的 19 波束 L 波段多波束馈源[4]。

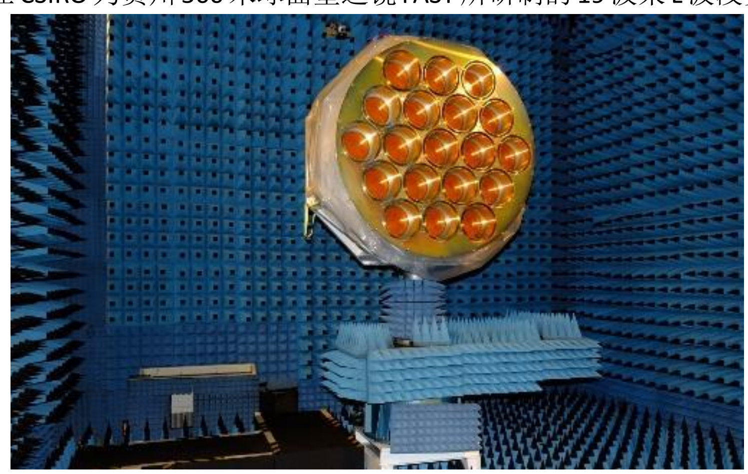


图 1 FAST 19 波束馈源

Fig.1 19 beam feed for FAST

相控阵馈源是另外一种形式的焦平面接收机馈源方式。与传统多波束馈源不同，它是由阵列天线结合后级波束合成网络组合而成，优势在于其可实现相控阵功能，即对各个阵元的幅度和相位进行调控，波束之间相互交叠，可形成连续的视场覆盖，直接对某一天区范围进

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期：　修订日期：

作者简介：段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者：闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

行电扫描，如若采用阵元复用功能的数字波束合成网络，即可实现该天区范围的同时观测[5]。图 2 为加大拿 DRAO 为 PHAROS 工程 (PHased Arrays for Reflector Observing Systems)研制的 Vivaldi 阵元组成的相控阵馈源样机[6]。



图 2 DRAO 相控阵馈源样机

Fig.2 The prototype of phased array feed for DRAO

鉴于相控阵馈源实际就是一个放置于射电望远镜焦平面位置的小型相控阵，因此在做阵列设计时，除需结合反射面焦面场分布及望远镜拟实现的视场以外，阵列自身的设计优化与阵列天线相似，相关的性能验证也可参照传统相控阵进行。

1 阵列天线设计

微带天线是在带有导体接地板的介质基片上贴加金属薄片而形成的天线[7]，鉴于其易加工、成本低，以及馈电方式灵活等特点，在通信等领域被广泛应用[8]。

为了对相控阵馈源技术进行相关研究，对阵列天线进行设计及验证，本文结合微带贴片天线试制的便利性，设计了工作在 1.27GHz 窄带的 2×2 的微带贴片天线阵列，希望在此基础上开展关于阵列天线相关的性能验证，以便进一步结合反射面开展相控阵馈源的设计。图 3 为阵元间距设置为 0.7 倍波长[9]（17cm）的 2×2 矩形排布微带贴片天线阵列模型。

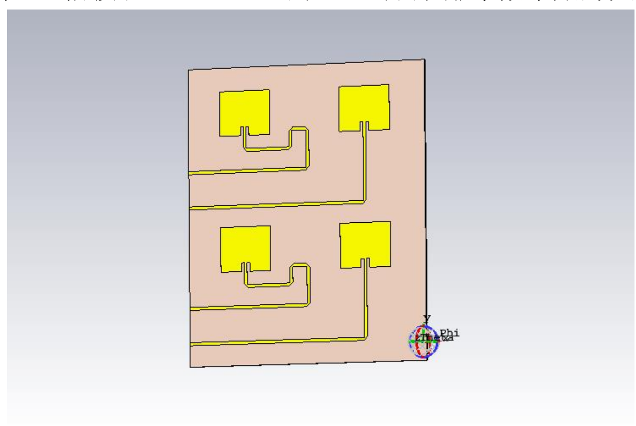


图 3 1.27GHz 贴片天线阵列模型

Fig.3 Patch antenna array model at 1.27GHz

将阵列第一行由左至右的阵元定义为 1 和 2 号阵元，将阵列第二行由左至右的阵元定义

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期： 修订日期：

作者简介： 段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者： 闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

为 3 和 4 号阵元。首先，在仿真软件中分别对阵列的 4 个阵元的馈电端进行了回波损耗仿真，仿真结果如图 4 所示，在 1.27GHz 对应频点的的 S11 分别为-29、-35、-27 和-40dB。

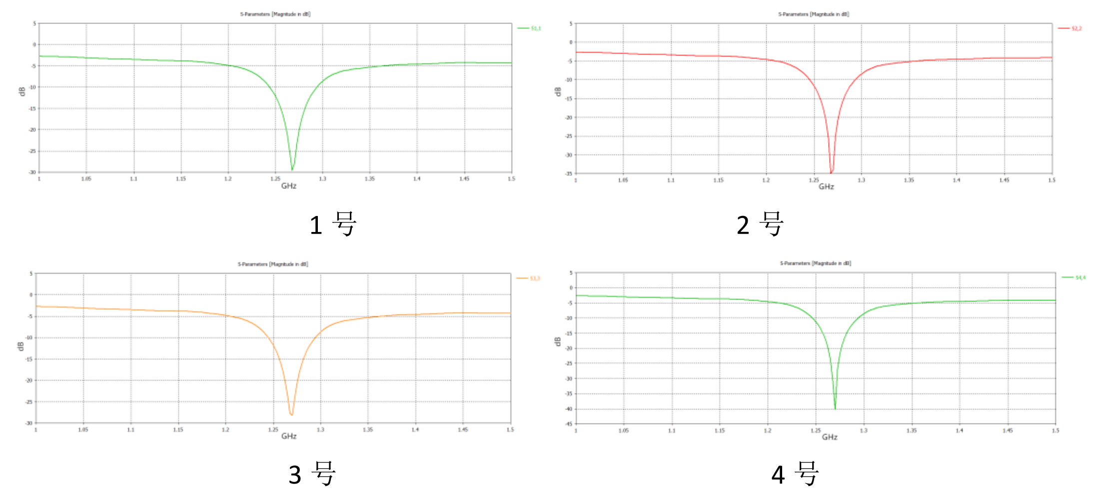


图 4 各阵元端口回波损耗仿真结果

Fig.4 Simulation results of return loss for each element port

之后，对各阵元方向图进行仿真。图 5 为各阵元的 E 面天线方向图仿真结果，仿真结果显示 4 个阵元天线的 E 面方向性系数分别为 5.18、5.17、5.25、5.25dBi。

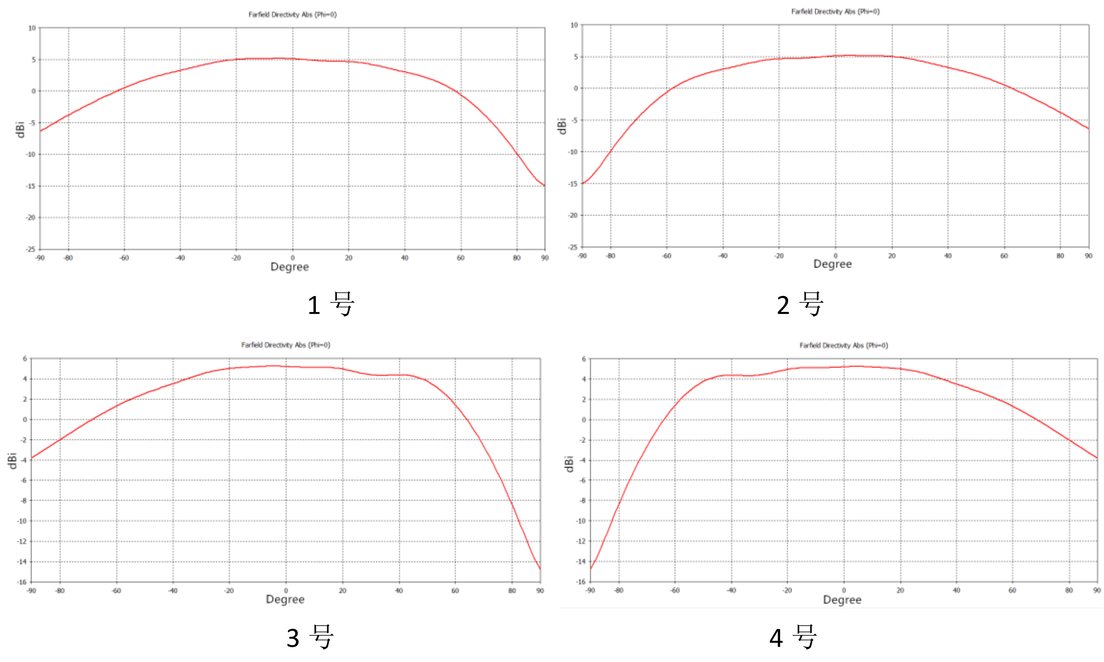


图 5 各阵元 E 面方向图仿真结果

Fig.5 Simulation results of E-plane pattern for each element

其次，对 4 阵元的波束合成进行仿真。图 6 为 4 个阵元等幅同相激励合成后的 E 面方向图仿真结果，可以看到 E 面的方向性系数为 13.1dBi。

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078)；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157)；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018)；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014);中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期： 修订日期：

作者简介： 段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者： 闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

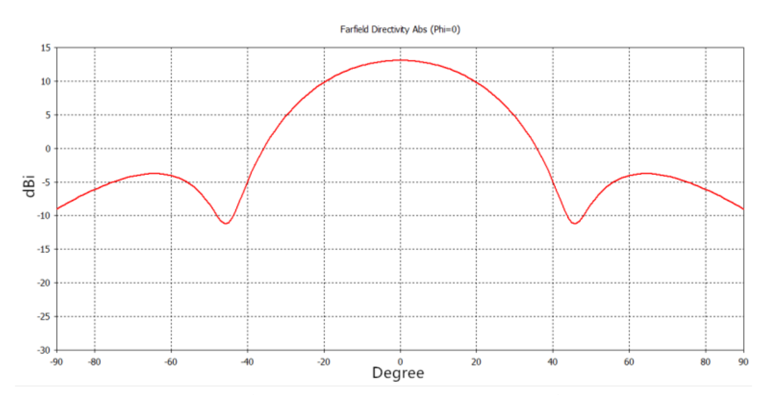


图 6　4 阵元合成的 E 面方向图仿真结果

Fig.6 Simulation result of E-plane pattern for beamforming with 4 elements

最后，对该阵列进行了波束扫描仿真。图 7 为该天线阵列向负方向理论偏移 30 度时的仿真结果，其中 4 个阵元幅度相同、2 和 4 号天线相位添加 125 度（根据 1.27GHz 的工作波长、17cm 的阵元间距，以及 30 度的理论偏移角度计算得出），仿真结果可以看到 E 面的主波束方向性系数为 12dBi，波束向负方向偏移了 23 度。

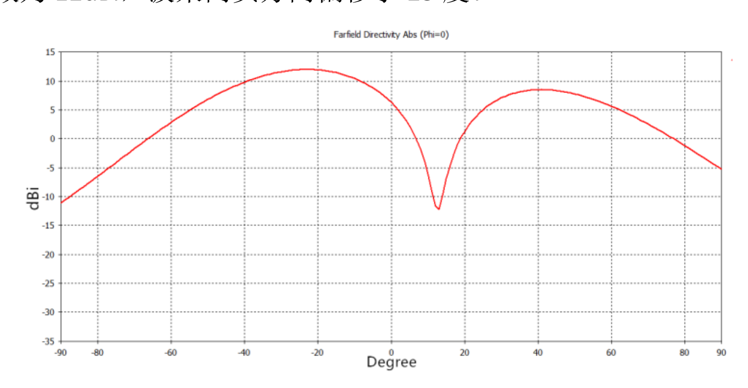


图 7　阵列波束扫描仿真结果

Fig.7 Simulation result of beam scanning for array antenna

2　4 阵元天线阵列加工及实测

结合上述仿真模型，我们在实验室加工了 4 阵元微带贴片天线阵列实物，并在各馈电端口焊接了 SMA 接头，天线阵列实物如图 8 所示。之后，结合实验室平台对该阵列的相关性能进行验证。

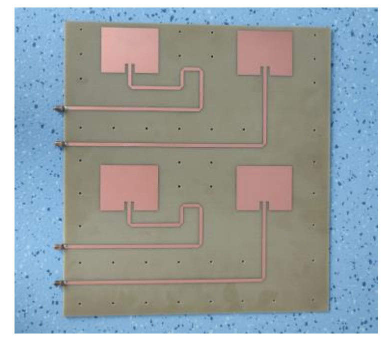


图 8 4 阵元微带贴片天线阵列实物

Fig. 8 The prototype of 4 elements microstrip patch antenna array

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期：　修订日期：

作者简介： 段雪峰，男，学士. 研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者： 闫浩，男，硕士. 研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

2.1 回波损耗测试

利用矢量网络分析仪，将测试带宽调整为 1-1.5GHz,分别对该阵列天线 4 个端口的回波损耗进行了测试，测试现场如图 9 所示。

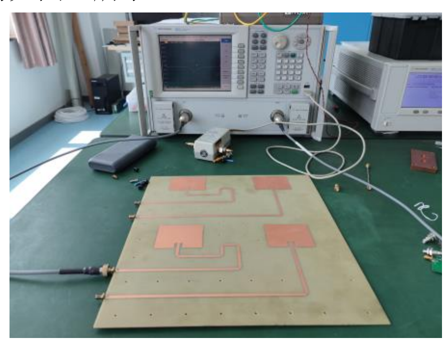


图 9 回波损耗测试

Fig.9 The test of return loss

各端口回波损耗测试结果如图 10 所示，结果显示 4 个端口的 S11 分别为-12.6，-13.8，-18.2，-21.3dB，和仿真结果相比（-29、-35、-27 和-40dB）均有不同程度恶化。经对比发现，之前仿真优化的最佳工作频点 1.27GHz，在 4 个端口实测中均不同程度有向低频端移动的现象，使得设计频点的 S11 恶化，这可能和各端口 SMA 接头焊接有关，但 4 个端口 S11 实测整体还是在-10 dB 以下，满足基本的回波损耗设计指标。

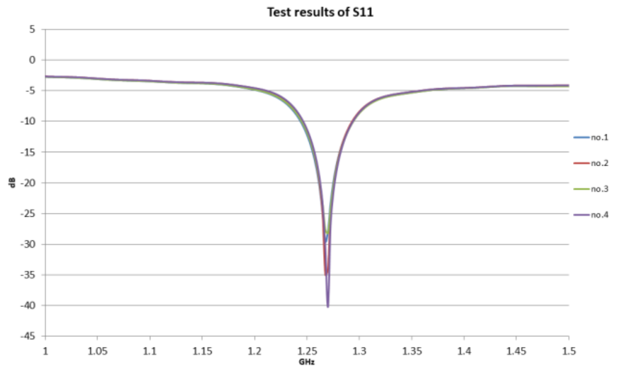


图 10 各阵元端口回波损耗实测

Fig.10 Measured results of return loss for each element port

2.2 方向图测试

之后，在实验室初步搭建了一个一维的方向图测试平台。该平台由信号发生器、标准增益喇叭，以及一维转台组成，如图 11 所示。其中，信号发生器工作范围在 250KHz-67GHz，标准增益喇叭工作在 0.6-6GHz，转台可实现±250°旋转。

图 11 一维的方向图测试平台

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期： 修订日期：

作者简介： 段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者： 闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

Fig.11 Pattern test platform with one-dimensional

图 12 为各阵元的 E 面方向图实测结果，从图中可以看到方向图增益分别为 1.08、2.96、3.48、4.06 dBi，与仿真结果对比（5.18、5.17、5.25、5.25dBi）略有下降，但方向图形状和仿真结果比较接近。

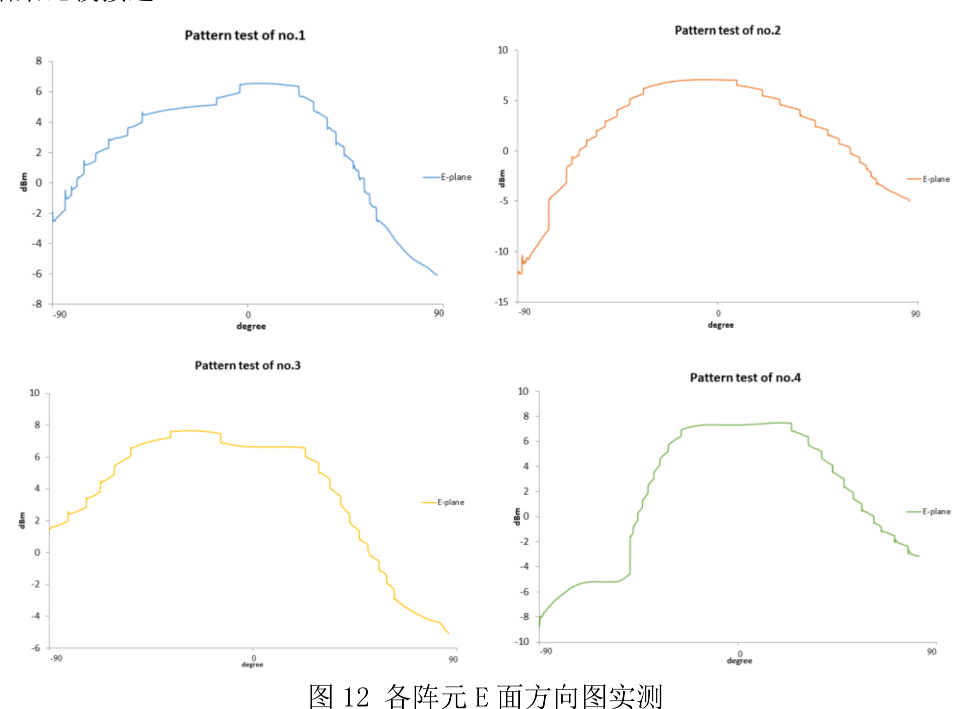


图 12 各阵元 E 面方向图实测

Fig. 12 Measured results of E-plane pattern of each element

2.3 波束合成测试

之后，选用 4 条相同长度的微波电缆和一个 1 分 6 的功分器（其中 2 路未用的端口连接匹配负载），对该阵列进行等幅同相的波束合成，并对合成后的波束进行方向图测试，波束合成后的 E 面方向图测试结果如图 13 所示，可以看到合成后的波束增益为 12. 54 dBi，比仿真结果稍有下降（仿真为 13.1 dBi）。

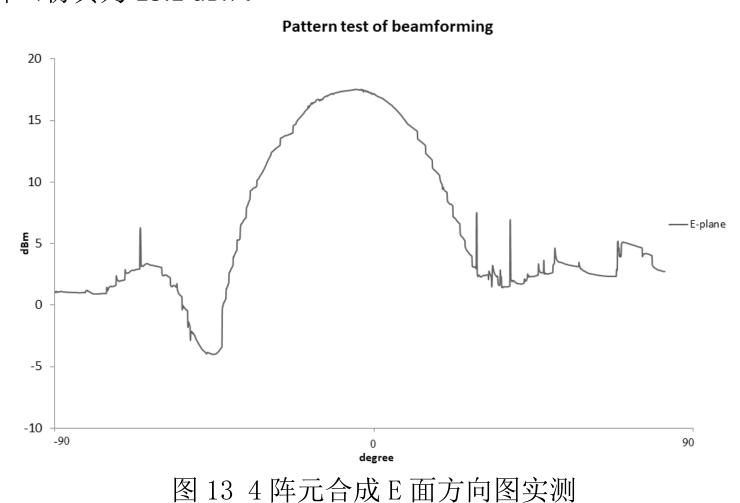


图 13 4 阵元合成 E 面方向图实测

Fig.13 Measured result of E-plane pattern for beamforming with 4 elements

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.
收稿日期： 修订日期：
作者简介： 段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn
通信作者： 闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

2.4 波束扫描测试

最后对该阵列进行波束扫描的测试。按照向负方向理论偏移 30 度计算，利用添加延时线的方法，保持 1 和 3 号阵元微波电缆长度不变，按照相控阵波束扫描计算，2 和 4 号阵元需添加 8.26cm 延时线以完成阵列合成波束指向偏移 30 度的方向，波束扫描合成链路如图 14 所示。



图 14 波束扫描合成网络

Fig.14 Beamforing network for beam scanning

波束扫描后的阵列合成方向图实测结果如图 15 所示，可以看到主波束的增益为 11.12dBi，虽比 12dBi 的仿真结果略低，但对应的波束偏移角度为 28.3 度，比仿真结果（23 度）更接近于 30 度的设计值。

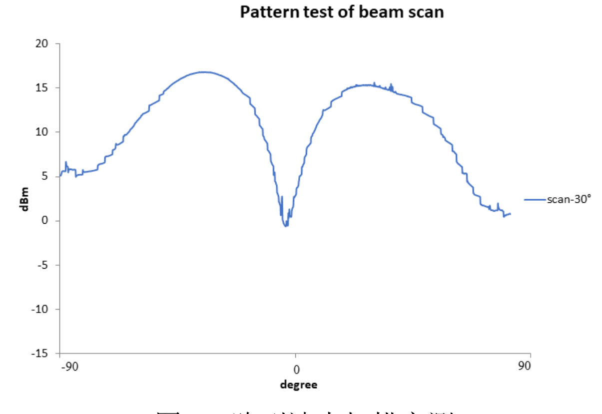


图 15 阵列波束扫描实测

Fig.15 Measured result of beam scanning for array antenna

3 结论

结合相控阵馈源研制需求，本文设计及加工了 1.27GHz 下 4 阵元微带贴片天线阵列，并结合实验室条件对该阵列天线的回波损耗、方向图、波束合成及扫描等关键性能进行了测试。测试结果显示，阵列各端口 S11 均低于-12.6 dB，4 阵元均匀激励合成后波束增益为 12.54dBi，通过为对应阵元添加理论偏移 30 度的延时线，实测阵列的波束扫描角度为 28.3 度、波束增

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院"西部之光"人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期：　修订日期：

作者简介： 段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者： 闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

益为 11.12dBi。虽然测试和仿真结果有一定差异，这与阵列天线装配及实验室测试环境不完善相关，但相关工作的开展为阵列天线的性能验证积累了经验，也为未来更多阵元数量的阵列天线研发打下了基础。下一步，可结合更为完善的方向图测试平台及数字波束合成网络开展相关工作，以更好的助力未来实用型相控阵馈源研发。

参考文献

[1] 王娜. 新疆奇台 110 米射电望远镜[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014,44(8):783-794.

Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope[J].Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014,44(8):783-794.

[2] 王凯, 陈卯蒸, 马军,等.射电天文毫米波接收机强度校准[J].天文学报, 2018,59(5):1-14.

Wang K, Chen M Z, Ma J, et al. The Amplitude Calibration of Radio Astronomy Millimeter Wave Receiver[J]. ACTA ASTRONOMICA SINICA, 2018,59(5):1-14.

[3] 王凯,闫浩,段雪峰,等.K 波段常温接收机噪声注入定标方法分析研究[J].天文研究与技术,2020,17(04):439-445.

Wang K, Yan H, Duan X F, et al. Analysis and Research on Noise Injection Calibration Method of K-band Ambient Temperature Receiver[J]. ASTRONOMICAL RESEARCH AND TECHNOLOGY, 2020,17(04):439-445.

[4] Peng Jiang,Ning-Yu Tang,Li-Gang Hou,Meng-Ting Liu,Marko Krco,Lei Qian,Jing-Hai Sun,Tao-Chung Ching,Bin Liu,Yan Duan,You-Ling Yue,Heng-Qian Gan,Rui Yao,Hui Li,Gao-Feng Pan,Dong-Jun Yu,Hong-Fei Liu,Di Li,Bo Peng,Jun Yan,FAST Collaboration.The fundamental performance of FAST with 19-beam receiver at L band[J].Research in Astronomy and Astrophysics,2020,20(05):5-32.

[5] 伍洋. 射电望远镜天线相控阵馈源技术研究[D].西安电子科技大学,2013.

Wu Y. Research on phased array feed technology of radio telescope antenna [D]. Xidian University, 2013.

[6] G. Lacy and A. Gray.URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, 2011:2

[7] 林昌禄.天线工程手册[M].北京：电子工业出版社. 2002:463-519.

LIN L C. Antenna engineering manual [M].Beijing: Electronic Industry Press, 2002:463-519.

[8] 任丽红,王浩.一种 2.4GHz 圆极化微带贴片天线的设计与实现[J].电子测试,2020(22):74-75+38.

Ren L H, Wang H. Design and implementation of a 2.4GHz circularly polarized microstrip patch antenna [J]. Electronic Testing, 2020 (22): 74-75+38.

[9] 段雪峰,王凯,李健,等.阵列天线互耦效应研究[J].天文研究与技术,2022,19(06):606-612.

Duan X F, Wang K, Li J, et al. Research on Mutual Coupling of Array Antenna [J]. ASTRONOMICAL RESEARCH AND TECHNOLOGY, 2022,19(06):606-612.

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期： 修订日期：

作者简介： 段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者： 闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn

Development and testing of 4-element microstrip antenna array

DUAN Xuefeng[1,2], YAN Hao[1,2], WANG Kai[1,2], LI Jian[1,2], CAO Liang[1,2], PEI Xin[1,2], MA Jun[1,2]

(1. Xinjiang Astronomical observatory, Chinese Academy of Sciences, Xinjiang, Urumqi, 830011, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Microwave Technology, Urumqi 830011, China)

Abstract: The array antenna is placed at the focal plane of the radio telescope and combined with the beam forming network to observe a sky area at the same time to achieve greater field of view coverage. Because the amplitude and phase of each element need to be adjusted, the array antenna is actually a small phased array. Therefore, when designing the array, in addition to combining the focal field distribution of the telescope and the field of view to be achieved by the telescope, the performance verification of the array itself can refer to the traditional phased array. This paper designs a 2 × 2 rectangular microstrip patch antenna array with element spacing of 0.7 times the wavelength. The measured results show that the S11 of each port is all below -10dB, and the beam gain after the beamforming of 4 elements is 12.54dBi. By adding a delay line with a theoretical deviation of 30 degrees to the corresponding element, the beam scanning angle of the array is 28.3 degrees. Although the measured data are slightly different from the simulation results, which is related to array fabrication and feed port welding, the related work has accumulated experience for the design, development and testing of array antenna with more elements, and it has a good guiding significance for performance verification.

Key words: Receiver; Array antenna; Return loss; Pattern; Beam scanning

*基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划研究（2020E01041）；国家自然科学基金（11973078）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01A157）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔族自治区重点实验室开放课题 (2020D04014)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期： 修订日期：

作者简介： 段雪峰，男，学士.研究方向：数字终端技术. Email:duanxuefeng@xao.ac.cn

通信作者： 闫浩，男，硕士.研究方向：接收机技术. Email:yanhao@xao.ac.cn